

Dynamik in den Mechanikunterricht

Hartmut Wiesner*

Verena Tobias*, Christine Waltner*, Martin Hopf[†], Thomas Wilhelm[°], Ahmet Ilhan Sen[~]

*LMU München, [†]Kompetenzzentrum Wien, [°]Universität Würzburg, [~]Hacettepe Universität Ankara

Kurzfassung

Die Rezeption der konstruktivistischen Ideen von Piaget regte Anfang der 70er Jahre zu umfangreichen Untersuchungen von Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten an. Die Mechanik ist der seither am intensivsten untersuchte Bereich der Physik, ergänzt durch eine parallel verlaufende langjährige Entwicklung und Evaluation von Unterrichtskonzepten.

In dem Beitrag wird einer dieser Untersuchungs- und Entwicklungsstränge beschrieben und charakterisiert als ein typisches Vorgehen in einem Arbeitsprogramm des Design-Based Research und des Begriffswechsels.

1. Einleitung

Über den Mechanikunterricht ist in den letzten 40 Jahren zu den verschiedensten Facetten eine praktisch kaum noch überschaubare Fülle von Arbeiten erschienen. Eine befriedigende Lösung der Lernprobleme in der Mechanik ist u.E. zur Zeit aber noch nicht erreicht. Es gibt allerdings auch bemerkenswerte Teilerfolge.

In diesem Beitrag wird ein Überblick über die Entwicklung und Evaluation eines bestimmten Konzeptes für den Mechanikunterricht gegeben, das wir für eine relativ erfolgversprechende Alternative halten. Zwei allgemeinere Aspekte sollen besondere Berücksichtigung finden: (a) Das Forschungs- und Entwicklungsprogramm wird eingeordnet in einen Rahmen, der heute unter Design-Based Research - oder etwas allgemeiner - unter nutzenorientierter Grundlagenforschung diskutiert wird. Weiterhin wird (b) auf die jeweiligen Ansätze zu Begriffswechsel und Begriffsentwicklung hingewiesen, die als Hintergrundtheorien die verschiedenen Abschnitte der Forschung und Entwicklung beeinflussen. Ergebnisse der Teilstudien geben Hinweise für Bestätigungen oder ein Infragestellen der lerntheoretischen Annahmen.

2. Design-Based Research als ein notwendiges Arbeits- und Forschungsprogramm der Physikdidaktik

Die Wissenschaft Didaktik der Physik hat als Gegenstand alle Fragen, die das Lernen und Lehren von Physik betreffen, von der Zielproblematik bis hin zu allen Facetten der Anregung von Lernprozessen und deren Überprüfung. Sie muss die ganze Spanne abdecken von der theoretischen und empirischen Bearbeitung allgemeinerer Fragestellungen – im Folgenden Grundlagenforschung genannt – bis hin zur Bereitstellung evaluierter Lernumgebungen

(inklusive detailliert ausgearbeiteter Unterrichtsmaterialien und passend zugeordneter Unterrichtsmethoden) (s. Abb. 1).

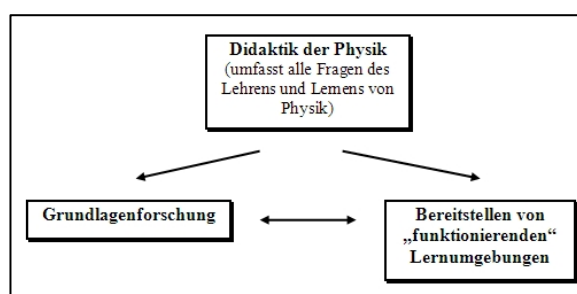


Abb. 1: Forschungs- und Entwicklungsaufgaben der Physikdidaktik

Sowohl intensive Grundlagenforschung als auch die Entwicklung und Evaluation von Unterrichtskonzepten sind notwendiger Bestandteil der Didaktik der Physik. Gegenseitige Vorbehalte und gegenseitiges Abwerten der beiden Richtungen sind kontraproduktiv. Darüber hinaus vertreten wir den Standpunkt, dass weniger die gegenseitige Toleranz als die Synthese dieser beiden Extrempositionen für den Bestand und die Akzeptanz der Physikdidaktik erforderlich sind.

Analysiert man die Situation des gegenwärtigen Physikunterrichts, dann besteht ein breiter Konsens darüber, dass die Ergebnisse nicht zufriedenstellend sind und die Lehrkräfte vor einer Vielzahl von ungelösten Problemen stehen. Seit einigen Jahren wird in der Bildungsforschung intensiv darüber diskutiert, welche Forschungsansätze am besten Abhilfe versprechen (s. z.B. Reinman, 2005, F. Fischer 2005; Hopf, Wiesner, 2007).

In dieser Diskussion wird an der rigorosen empirischen Grundlagenforschung nach den Standards der pädagogischen Psychologie kritisiert, Wissen zu

produzieren, das für die Schulpraxis wenig oder gar nicht relevant ist. (Und falls doch, findet es selten den Weg in das Klassenzimmer, weil der erforderliche Implementationsaufwand nicht als Teil der Grundlagenforschung angesehen wird.) Kritiker weisen weiterhin darauf hin, dass die bisherigen Untersuchungen - zur Kontrolle von Einflussfaktoren meist als Labor- oder laborähnliche Studien durchgeführt - keine oder geringe Effekte (Bereiter, 2002) oder aus Sicht der Schulpraktiker banale Selbstverständlichkeiten oder nichtpraktikable Vorschläge liefern. Überraschend ist dies aufgrund der Vielzahl der möglichen und untereinander wechselwirkenden Faktoren im hochkomplexen Unterrichtsgeschehen nicht. Eine typische Vorgehensweise für eine empirische Untersuchung wäre die folgende: Aus Unterrichtserfahrungen oder Vorstudien hat man die Vermutung, dieser und jener Faktor sind für Unterschiede im Lernerfolg von großer Bedeutung. Um die Vielzahl anderer Einflussfaktoren möglichst kontrolliert konstant zu halten führt man eine Laboruntersuchung und keine Untersuchung in der Schulrealität durch. Bei zwei Faktoren benötigt man im einfachsten Fall vier umfangreiche Gruppen. Nun ist es in der Lehre meist so, dass der Lernerfolg nicht monoton von dem Einflussfaktor abhängt, sondern bei irgendeiner Merkmalsausprägung einen Extremwert annimmt, der wiederum von den Merkmalsausprägungen vieler anderer Faktoren abhängt. Die Anzahl der benötigten Gruppen mit kontrollierten Merkmalsausprägungen der untersuchten Wirkungsfaktoren steigt damit explosionsartig an. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass bei dem erforderlichen riesigen Aufwand das Auffinden belastbarer und nützlicher Ergebnisse sehr schwierig ist. Hinzu kommt ein weiteres Problem: In jeder Untersuchung treten zwischen Teilgruppen Unterschiede auf – oder bei Anwendung der Treatmentidee auf einen anderen Inhalt – die es in neuen Untersuchungen aufzuklären gilt. Dafür müssen verfeinerte Variablensätze gewählt werden, mit dem gleichen Aufwandsproblem wie vorher. Insgesamt kann deshalb das Ganze – der reale Physikunterricht – aus dem Auge verloren werden.¹

Die vorgebrachten Kritikpunkte haben sicherlich eine gewisse Berechtigung und es werden deshalb alternative Forschungsansätze diskutiert, die die Nutzenorientierung nicht vernachlässigen.

¹ Die an sich gerechtfertigte Forderung, die Lehr-Lern-Forschung theoriegeleitet durchzuführen, kann kurzfristig auch negative Auswirkungen haben. Die derzeitigen Theorien des Lehrens und Lernens im Physikunterricht sind ohne Zweifel zu eingeschränkt, um das komplexe Unterrichtsgeschehen angemessen abzubilden. Sich in dieser Situation einer Theorie zu unterwerfen, schränkt bezüglich Sichtweisen und Handlungsmöglichkeiten auch erheblich ein.

Ein eindimensionales Gegeneinander von Grundlagenforschung und anwendungsbezogener Entwicklung wird den Bildungswissenschaften, die gleichermaßen Nutzen und Erkenntnis liefern sollen, nicht gerecht. Konsequente Grundlagenforschung wäre als einer der Pole nicht mit dem anderen Pol, der Anwendung, vereinbar. Dieser vereinfachten Sichtweise setzt D. Stokes ein anspruchsvolleres, zweidimensionales Modell mit den beiden Dimensionen Nutzen und Erkenntnis entgegen (s. Abb. 2).

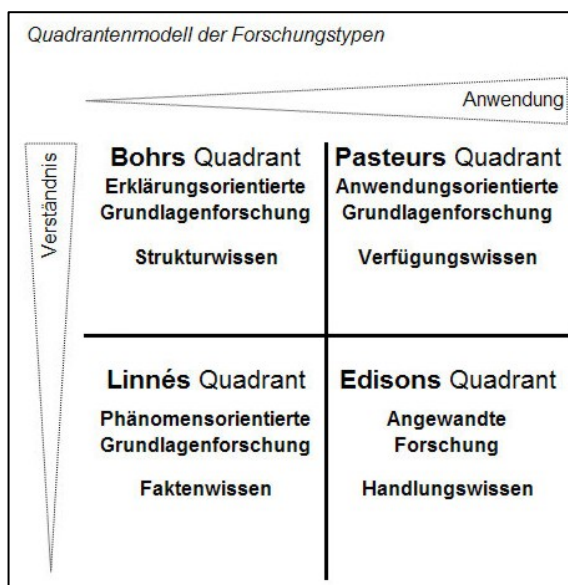


Abb. 2: Pasteurs Quadrant (nach Kölbel, Matthias (2004): Wissensmanagement in der Wissenschaft, S.96.

Verfügbar unter:

http://www.wissenschaftsforschung.de/JB04_89-101.pdf

N. Bohr ist ein typischer Vertreter der reinen Grundlagenforschung ohne jegliches Interesse an technischen Anwendungen. Th. Edison ist der Gegenpart: Er war nur an einer profitablen Elektrifizierung interessiert und nicht an allgemeinen Grundlagenerkenntnissen. Der pasteursche Quadrant stellt eine Synthese dar: er vereinigt Nutzen mit Erkenntnis. Ausgehend z.B. von dem praktischen Problem, wie man das Verderben von Wein bei der Herstellung verhindern kann, entdeckte Pasteur bestimmte Bakterien, die ohne Sauerstoff leben können. Dies war sowohl eine bedeutende Grundlagenerkenntnis als auch von großem praktischem Nutzen für die Produktion.

Die Didaktik der Physik ist in diesen Quadranten einzuordnen und ein entsprechendes Arbeitsprogramm ist zu etablieren. Dieses Programm muss einerseits in möglichst kurzer Zeit eine Lösung für drängende, praktische Probleme des Physikunterrichts anbieten, auch wenn wir im Detail die einzelnen Einflussfaktoren und ihr komplexes Wechselwirkungsgefüge nicht – noch nicht – kennen. Im Prinzip, wenn auch nicht so drängend, liegt eine Situation wie bei einer Krankheit vor: Wenn man krank ist und zum Arzt geht, erwartet man eine so-

fortige erfolgreiche Therapie, basierend auf der Basis des aktuellen medizinischen Wissens. Man will und kann nicht warten bis die medizinische Grundlagenforschung alle physiologischen und pharmazeutischen Wechselwirkungen geklärt hat und eine noch optimalere Lösung als derzeit möglich gefunden ist. Damit aber langfristig bessere Lösungen zur Verfügung stehen, darf die medizinische Grundlagenforschung nicht vernachlässigt werden. Stokes hebt hervor, dass Praxis und Grundlagenforschung sich gegenseitig stark positiv beeinflussen. Es werden die aus Sicht der Praktiker *relevanten* Fragestellungen definiert – das sind nicht unbedingt die, die z.B. die Fachdidaktiker stellen – und diese werden nach etablierten Standards sowohl bezüglich kurzfristiger Problemlösungen als auch dabei auftretender grundlegender Fragen bearbeitet. Durch letzteres entsteht kumulatives Wissen, das wiederum in die Lösung von Problemen eingeht.

Die Kluft zwischen den Ergebnissen der hochelaborierten Grundlagenforschung und den konkreten Problemen und Bedürfnissen der Lehrkräfte in der Schule mit den dortigen hochkontextabhängigen Effekten zu überwinden, ist die Absicht einer Forschergruppe, die ihren Ansatz Design-Based Research (DBR) nennt. Folgende Kriterien für eine nutzenorientierte Grundlagenforschung werden von dem Design-Based Research Collective genannt (DBRC, 2003; sinngemäß zitiert nach Fischer et al. 2005):

- a) Die Ziele, gute Lernumgebungen zu gestalten und Theorien oder „Prototheorien“ des Lernens zu formulieren werden miteinander verknüpft. (Auch Design-Methodologien sollen entwickelt werden, also präskriptive Theorien zur Entwicklung von Lernumgebungen.)
- b) Entwicklung und Forschung finden in kontinuierlichen Zyklen aus Design, Umsetzung, Analyse und Re-Design statt. Die Optimierung, die Veränderungen und ihr Zustandekommen muss theoretisch erklärt werden.
- c) Designforschung muss zu expliziten Theorien führen, die Implikationen für Praktiker und andere Educational Designer haben.
- d) Wesentliches Ziel der Forschung muss es sein, zu erklären, wie die (um)gestalteten Lernumgebungen in spezifischen authentischen Kontexten funktionieren. Es sollen die Rahmenbedingungen als explizite Komponente in die Theorie integriert werden.
- e) Die Konstruktion solcher Erklärungen geschieht mittels Methoden, die die Umsetzungsprozesse mit bezweckten Ergebnissen der Umsetzung in Verbindung bringen können. Bei Bedarf werden neue Methoden entwickelt.

Ein anderer integrativer Ansatz ist von Mandl und Stark vorgeschlagen worden (2001), allerdings mit einer etwas stärkeren Betonung des Bereichs der Grundlagenforschung. Auch der ingenieurwissen-

schaftliche Ansatz von Burkhardt und Schoenfeld (2003) verdient Beachtung. Auf beide Ansätze soll hier nicht ausführlich eingegangen werden. Für Physiker ist der Vergleich mit den Ingenieurwissenschaften naheliegend. Ingenieure arbeiten an konkreten Problemstellungen, die nach verschiedenen Kriterien auf der Basis des gegenwärtigen Wissens optimal gelöst werden. Dabei treten neue Fragestellungen bezüglich der Grundlagen auf, es wird neues Wissen produziert, neue Design- und Testmethoden entwickelt, Methoden der Problemdefinition ausgearbeitet, es entsteht ein verbessertes Produkt usw.

Ein konkretes Beispiel: Vor etwa drei Jahren standen durch eine Schulreform viele Lehrkräfte in Bayern vor dem Problem, wie man erfolgreich Mechanik in der 7. Klasse oder Quantenphysik in der 10. Klasse unterrichten soll. Als Physikdidaktiker steht man dann in der Pflicht und vor der Herausforderung, in kurzer Zeit handhabbare Unterrichtsvorschläge zur Verfügung zu stellen, die befriedigend in der Praxis funktionieren. Liefern wir nicht nach kurzer Zeit eine aus Sicht der Schulpraktiker akzeptable Problemlösung werden wir – mit einigem Recht – nicht ernst genommen und verlieren langfristig die Partnerschaft mit unseren Anwendern und Forschungskollegen in der Schule. In solchen aktuellen Problemsituationen können wir nicht warten bis eine umfassende, zutreffende und anwendungsfreundliche Theorie des Lehrens und Lernens physikalischer Begriffe entwickelt worden ist, um dann auf dieser Grundlage eine theoretisch fundiertere und erfolgreichere Lernumgebung als derzeit möglich zu entwickeln.

Im Folgenden wird am Beispiel der Mechanik ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm skizziert, das wesentliche Ideen des DBR aufgegriffen hat. Der Bericht folgt dem zeitlichen Projektablauf. An entsprechenden Stellen wird auf die jeweilige theoretische Annahme für eine Begriffsentwicklung bzw. einen Begriffswechsel eingegangen.

3. Entwicklung einer Lernumgebung zur Mechanik als Beispiel für ein DBR-Projekt und Ansätze für Theorien der Begriffsentwicklung und des Begriffswechsels

3.1 Mechanik im Anfangsunterricht

Ausgehend von eigenen langjährigen Erfahrungen im Mechanikunterricht und der Analyse der beobachteten massiven Lernschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler initiierte Jung unter Mitarbeit von Reul und Schwedes (JRS) Ende der 60er ein Projekt, das sie als einen „ersten Schritt in einem langfristig angelegten Forschungsprojekt ‚Lernschwierigkeiten im Physikunterricht‘“ ansahen. Jung war nach unserer Einschätzung der erste Fachdidaktiker, der im deutschen Sprachraum die Arbeiten Piagets rezipiert und sich mit dessen Theorien kritisch auseinander gesetzt hat. Zusammen mit

Schwedes sah er u.a. die strikte Stufenfolge mit ihrer Einschränkung bezüglich der kognitiven Möglichkeiten von Kindergarten- und Schulkindern als nicht überzeugend an. Sie führten Replikationsstudien zu Piagetaufgaben durch mit vergleichbaren Ergebnissen², wie sie z.B. M. Donaldson später berichtete (1982). Entsprechend ging die Gruppe entgegen der Auffassung von Piaget als Hypothese davon aus, dass bereits Grundschulkindern die grundlegenden Ideen der Mechanik (vektorieller Geschwindigkeitsbegriff, Zusammenhang von Geschwindigkeitsänderung und Einwirkung, Konzept des Stoßes, ...) vermittelt werden können. Der lern- und entwicklungstheoretische Ansatz entsprach dem, der heute als konstruktivistische Auffassung vom Lernen bezeichnet wird. Danach erwerben wir neues Wissen auf folgende Art: Über unsere Sinneskanäle nehmen wir Sinnesreize auf, z.B. Schriftzeichen, Tafelbilder, Gestalten, experimentelle Anordnungen, Laute, usw. Diese Sinnesreize sind zunächst nichts weiter als bloße Eindrücke, die noch keine Bedeutung für den Empfänger haben. Bedeutung können diese Sinnesreize nur mit Hilfe der bei den Empfängern bereits vorhandenen Denk- und Wissensstrukturen erhalten, die im Langzeitgedächtnis gespeichert sind und aktiviert werden müssen. Werden in der Lernsituation für das Entwickeln der physikalischen Begriffe ungeeignete Wissens Elemente aktiviert, treten Lernschwierigkeiten auf. Die fachdidaktische Aufgabe besteht deshalb darin, geeignete Situationen herzustellen, in denen anknüpfungsfähiges Vorwissen aktiviert wird und davon ausgehend die physikalische Sicht entwickelt wird.

Die domainspezifischen Betrachtungen, die bei JRS im Zentrum standen, hatten in den 70ern einen relativ hohen Stellenwert (s. z.B. Shavelson 1972), verloren dann zunächst durch Piagets inhaltsunabhängige Theorien und in den 90er durch die Orientierung an den allgemeinen Fragestellungen der pädagogischen Psychologie an Gewicht. Derzeit gewinnen sie nach unserer Einschätzung in der Fachdidaktik wieder an Boden.

Auf der Basis intensiver erkenntnistheoretischer, physikhistorischer und lernpsychologischer Überlegungen und Studien, Unterrichtserfahrungen und einer kritischen Auseinandersetzung mit Piagets Untersuchungen zur Entwicklung des Geschwindigkeitsbegriffs wurde das nachfolgend dargestellte Unterrichtskonzept inklusive Experimenten, Medien und Leistungstest entwickelt und nach einer Vorstudie wurden in der Hauptstudie seine Effekte in den Klassenstufen 3, 4, 5 und 6 untersucht.

² Leider wurden die Ergebnisse nicht veröffentlicht. Dies hätte vermutlich dazu beigetragen, dass nicht eine größere Zahl von Didaktikern erfolglos versucht hätte, Piaget für die fachdidaktische Forschung und Entwicklung zu nutzen.



Abb. 3: Titelblatt des Berichtes von JRS über die Untersuchung zur Einführung in die Mechanik im Anfangsunterricht

Die **Themenfolge** war:

- Schnelligkeitsvergleich
- Geschwindigkeit
- Pfeilbilder
- Geschwindigkeitsänderung
- Bezugssystem und Geschwindigkeit
- Geschwindigkeitsänderung und Zusatzgeschwindigkeit (Stoß)
- Reflexion (als Sonderfall des schrägen Stoßes)
- Zusatzgeschwindigkeit in Kurven
- Momentangeschwindigkeit
- Beschleunigte Bewegung
- Kurvenfahrt durch eine Folge seitlicher Stöße
- Anfahren und Bremsen als Sonderfälle der beschleunigten Bewegung.

Zentrale fachdidaktische Entscheidungen waren:

- a) konsequentes Verwenden des vektoriellen Geschwindigkeitsbegriffs („Ohne vektoriellen Geschwindigkeitsbegriff gibt es keine einheitliche **dynamische** Beschreibung der Phänomene, d.h. eine Beschreibung aufgrund des Zusammenspiels von Kraft und Bewegung.“ JRS, 1975, S. 10)
- b) Stoß als Paradigma für Wechselwirkung; ein Stoß führt zu einer Zusatzgeschwindigkeit; senkrechter Stoß als Schlüsselphänomen
- c) Deutung der Zusatzgeschwindigkeit als Bewegung eines Förderbandes

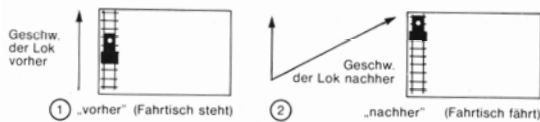


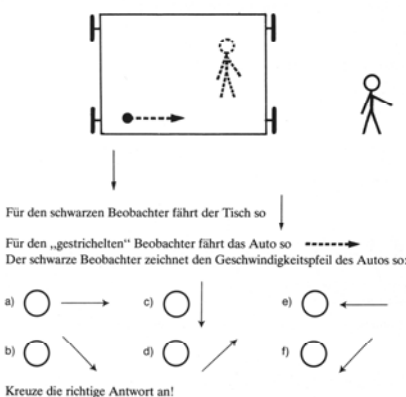
Abb. 4: Von JRS benutzte Förderbandanalogie für die Zusatzgeschwindigkeit

Der Projektbericht mit den Begründungen des Konzeptes, der sorgfältig durchgeführten und kritischen Beschreibung der empirischen Untersuchung, der sehr distanzierten differenzierten Diskussion der Ergebnisse, den Ausführungen über Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten und über curriculare Empfehlungen für den Mechanikunterricht hätte als ein Meilenstein fachdidaktischer Arbeiten angesehen werden müssen. Er wurde aber kaum rezipiert und es folgte keine kritische Auseinandersetzung.

Als zentrale Fragestellung für ihre Untersuchung formulierten JRS: „Ist es gleichsam entwicklungsnotwendig, dass die Kinder zunächst einmal für viele Jahre über den Richtungscharakter der (physikalischen) Geschwindigkeit nichts lernen, dass sie jahrelang einen am Muskelgefühl orientierten statischen – wenn nicht gar animistischen – Kraftbegriff ausbilden und erst sehr spät den Zusammenhang zwischen (physikalischer) Kraft und kinematischen Größen kennenlernen? Werden dadurch nicht Lernbarrieren aufgebaut, die das spätere Lernen korrekter dynamischer Begriffe erheblich erschweren?“ Dieser prophylaktische Ansatz („Vorbeugen ist besser als heilen!“) ist kennzeichnend für viele Arbeiten der Arbeitsgruppe um W. Jung.

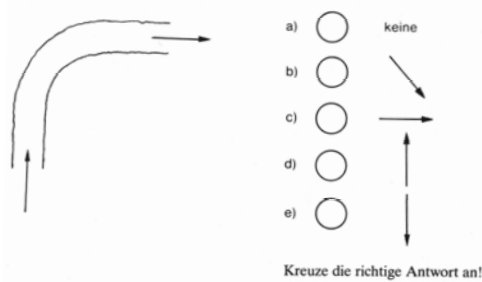
Hier kann nur auf einige Ergebnisse eingegangen werden. Beteiligt waren insgesamt 473 Schülerinnen und Schüler aus je 3 Klassen der Klassenstufen 3 und 4 und je 6 Klassen der Klassenstufen 5 und 6. Der Unterricht dauerte etwa 20 Stunden. Der Endtest bestand aus 21 Items, die in 7 Aufgabengruppen eingeordnet waren (Schnelligkeit, Geschwindigkeit, Bezugssystem, Zusatzgeschwindigkeit, Beschleunigung, Stoß und Masse). Hier jeweils ein Beispiel aus den Aufgabengruppen Bezugssystem, Zusatzgeschwindigkeit, Beschleunigung und Stoß:

Item 5
Auf einem fahrbaren Tisch fährt ein Auto.
Der „gestrichelte“ Beobachter fährt auf dem Tisch mit.
Der schwarze Beobachter steht auf dem Fußboden.



Item 11

Ein Auto fährt so in die Kurve hinein, und so kommt es heraus. Welche Geschwindigkeit (Zusatzgeschwindigkeit) hat es dazu bekommen?



Item 12

Ein Autofahrer sagt zu seinem Freund: Ich kann meinen Wagen beschleunigen, ohne das Gas zu verändern. Ich fahre

- a) ☐ einen Berg hinab
b) ☐ einen Berg hinauf
c) ☐ durch die Kurve

Kreuze alles an, was Dir richtig erscheint!

Item 20

Ein Boxer haut gegen einen schweren Ledersack (Punch), der quer vor ihm vorbeischießt. Kreuze an, wie sich der Sack nach dem Stoß weiterbewegt!
Von oben betrachtet!

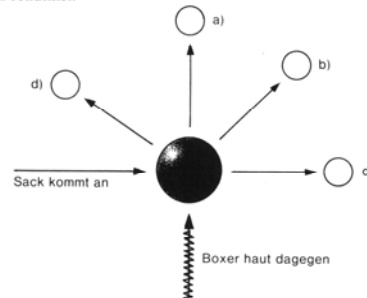


Abb. 5: Itembeispiele aus dem Abschlusstest

Die folgende Tabelle zeigt die Lösungswahrscheinlichkeiten für die Aufgabengruppen und die Klassenstufen (in Prozent):

	K4	K3	K5	K6
Schnelligkeit	99	82	86	78
Geschwindigkeit	83	66	61	54
Bezugssystem	78	59	53	53
Zusatzgeschwindigkeit	69	64	58	54
Beschleunigung	58	39	53	45
Stoß	76	47	42	42
Masse	48	25	16	9

Tabelle 1: Lösungswahrscheinlichkeiten in den einzelnen Aufgabengruppen und Klassenstufen

Die beiden hervorstechenden Ergebnisse sind,
(a) die Lernerfolge sind verblüffend hoch und
(b) die beiden Grundschulklassen sind signifikant besser als die Fünft- und Sechstklässler.

In Interviewserien wurde ergänzend zu dem schriftlichen Test das begriffliche Verständnis vertieft untersucht und eine Vielzahl von Lernschwierigkeiten aufgedeckt, die in den nachfolgenden Entwicklungen und Studien berücksichtigt wurden.

JRS zogen aus den Ergebnissen ihrer Untersuchung den Schluss, dass schon Grundschulkindern die grundlegenden Ideen der Mechanik vermittelt werden können und weiterhin, dass es sich lernerschwierend auswirkt, mit dem Mechanikunterricht bis zur 7. oder einer noch höheren Klassenstufe zu warten. In kritischer Auseinandersetzung mit den Ergebnissen von Piaget und dessen Interpretationen von der Entwicklung physikalischer Begriffe konnten JRS diese überzeugend in Frage stellen und damit – im Sinne des DBR – einen wichtigen Beitrag zur Konstruktion einer Theorie physikalischer Begriffsentwicklung leisten. Inzwischen besteht über die erstaunliche kognitive Leistungsfähigkeit jüngerer Kinder Konsens (z.B. Wilkening/Lamsfuß, 1993; E. Stern, 2003).

Wilkening und Lamsfuß (1993) beschreiben das Ergebnis ihres Forschungsprogramms folgendermaßen: „Insbesondere interessierte dabei, ob verschiedene Misskonzepte, die bei physikalischen Laien besonders häufig zu beobachten sind, auf kognitive Defizite struktureller Art zurückgeführt werden können. Für Erwachsene scheint diese Annahme unplausibel. ... Nicht so offensichtlich ist dies bei Kindern. Ihre Fehlvorstellungen wurden oft als Symptom altersspezifischer kognitiver Beschränkungen interpretiert. Die hier vorgelegten Daten zeigen, dass diese Erklärung nicht akzeptiert werden muss. Bereits das naive Wissen von Kindern im Vor- und Grundschulalter erweist sich als in hohem Maße aufgaben- und kontextabhängig und kann auf unterschiedlichen Repräsentationsebenen jeweils andere Formen annehmen. ... Hieraus ergeben sich Folgerungen sowohl für die Praxis als auch für die Grundlagenforschung: *Pädagogischen Bemühungen, das intuitive Wissen schon im Kindesalter zu verändern, stehen keine grundsätzlichen Hindernisse im Weg. Solche Versuche könnten sinnvoll sein, um der Entstehung und Verfestigung von Misskonzepten, die im Erwachsenenalter nur schwer zu beseitigen sind, präventiv entgegenzuwirken.* Für die Grundlagenforschung ergibt sich die Aufgabe, die naive Physik als eigenständigen Inhaltsbereich systematischer als bisher zu untersuchen, da sich ihre Entstehung nicht allein aus generellen kognitiven Entwicklungsveränderungen erklären läßt.“

Noch pointierter formuliert Stern die Möglichkeiten und Einschränkungen des Lernens physikalischer Inhalte durch Grundschulkindern: „Nicht die unabgeschlossene Hirnentwicklung hält Grundschulkindern davon ab, die Relativitätstheorie zu verstehen, sondern fehlendes mathematisches und physikalisches Wissen.“ (Stern, 2003)

Abschließend kann gesagt werden, dass das beschriebene Projekt als Kernforderungen des DBR-Ansatzes gleichzeitig sowohl allgemeines und domainspezifisches Wissen über das Lernen physikalischer Begriffe als auch - in der Überarbeitung auf

der Basis der neu gefundenen Lernschwierigkeiten - eine verfeinerte Lernumgebung als Produkt lieferte.

Ab der Endphase des beschriebenen Projektes gab es parallel zueinander verlaufend eine Vielzahl von Weiterentwicklungen und Studien in enger Verzahnung und gegenseitiger Bezugnahme. Die folgenden drei Stränge sind von besonderer Relevanz für die Weiterentwicklung des von JRS begründeten Mechanikkonzeptes:

a) Weiterentwicklung und Evaluation von Lernumgebungen mit dem Stoß-Konzept (bis etwa 1985)

Wichtige Teilprojekte waren: Zepperitz (Sek. I, 1974); Trageser (Sek. I, 1975); Weber u.a.: Erprobung des Mechaniklehrgangs von Jung (Ende der 70er) und als Endprodukt davon: Jung - Mechanik für die Sekundarstufe I (1980).

Parallel dazu wurden Lehrgänge mit gleichem Konzept für die Oberstufe entwickelt und evaluiert: Jung und Callsen (11. Klasse, 1974); Engelhardt (Grundkurs, 1976); Wiesner (Leistungskurse 1976 und 1980); Wiesner, Engelhardt, Hoffmann (Ausarbeitung eines Schulbuchtextes und begleitende Unterrichtserprobung, ab 1982).

b) Untersuchung von Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten (Mittelstufenschüler bis Physikstudierende) und Entwicklung von dafür geeigneten Erhebungsmethoden

c) Entwicklung und Evaluation von Lehrgängen nach dem Kraftstoßkonzept

Ab 1985 wurden mehrere Unterrichtsversuche in 10. Klassen von Wiesner, Spill, Herdt, Engelhardt, Wodzinski, Sen u.a. (z.B. Wiesner 1992c, 1994a,b; Wodzinski, Wiesner 1994a-c, Sen u.a. 2008) durchgeführt. Auf eine derzeit laufende Untersuchung in 7. Klassen wird in 3.4 noch ausführlicher eingegangen.

3.2 Weiterentwicklung und Evaluation von Lernumgebungen mit dem Stoß-Konzept

Der detailliert ausgearbeitete Lehrgang Mechanik für die Sekundarstufe von Jung (1980) verdient besondere Erwähnung, insbesondere wegen der dort und in zwei weiteren Aufsätzen in der Zeitschrift *physica didactica* (1977a, b) ausgeführten fachdidaktischen Begründungen. Hierzu gehören auch seine Überlegungen zum Impuls als grundlegender Größe und die Folgerung, den Weg über Geschwindigkeit und Masse zu gehen.

Gegenüber dem ersten Projekt wird der Stoß jetzt auch quantitativ definiert, und zwar durch

$$\vec{S}_{\text{stoß}} = m \cdot \Delta \vec{v}.$$

Die träge Masse wird über Impulserhaltung festgelegt und Kraft als Stoßrate eingeführt:

$$\vec{F} = \frac{\Sigma \vec{S}_{\text{Stöße}}}{\Delta t}.$$

Als letztes soll auf die Ausführungen von Jung zur Bedeutung von Kategorisierung und Kategorienwechsel beim Physiklernen hingewiesen werden, die in aktuellen Begriffswechseltheorien eine wichtige Rolle spielen. In der didaktischen Konzeption zu seiner Mechanik beschränkt er sich auf die 4 Kategorien Körper, Prozess, Eigenschaft, Beziehung und entsprechende Systeme. Als Ziel formuliert Jung: Der Schüler soll lernen „sich bei neuen Begriffen z.B. zu fragen: Ist es eine Eigenschaft, wovon ist es eine Eigenschaft? Ist es eine Beziehung, zwischen was ist es eine Beziehung? Und er soll weiter lernen, daß durch die Fortschritte der Physik Kategorienverschiebungen auftreten: Eine Eigenschaft wie „Gewicht“ wird als Beziehung erkannt. ...“ (Jung, 1980, S. 20) Eine detaillierte Diskussion findet sich in Jung, 1979.

Diese Umkategorisierung physikalischer Konzepte ist der zentrale Aspekt der Begriffswechseltheorie von Chi, Slotta, Reiner, Resnik u.a., die insbesondere den Kategorienwechsel von Substanz (Körper) zu Prozess untersuchten. Deutliche Lernschwierigkeiten treten danach dann auf, wenn ein solcher Wechsel der Kategorie erforderlich ist. Sie schreiben ähnlich wie Jung: „We have argued ... that many difficult physics concepts are actually processes - not substances - and that this ontological difference between expert and novices conceptions is responsible for the notorious difficulty by novices in moving from their initial conceptions to a more formal physics view.“ (Reiner, Slotta, Chi, Resnick 2000) Dass Chi et al. Wärme, elektrischen Strom und Licht als Vorgang einordnen, ist verständlich, diese Kategorisierung für Kraft vorzusehen, allerdings nicht. Kraft im physikalischen Sinne gehört u. E. in die Kategorie Beziehung.

Auch bei Vosniadou wird der Umkategorisierung der grundlegenden ontologischen und epistemologischen Einordnung eine besondere Bedeutung zugewiesen (s. 3.4.1).

Die Neukategorisierung von Kraft als Beziehung im physikalischen Kontext verändert auch die „Sicht“ auf die Phänomene. Fokussiert man auf einen Körper, der Bestandteil eines Phänomens ist, dann „sieht“ man in gewissem Sinn die Einwirkungen der anderen Körper des Systems auf den herausgegriffenen Körper – man sieht nun die Welt in „newtonscher Gestalt“.

3.3 Untersuchungen über Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten in Mechanik

Entsprechend der Ideen des DBR ist ein wesentlicher Schritt die präzise Beschreibung des zu lösenden Problems: Wo liegen die Schwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler, die in einer zu entwickelnden Lernumgebung beseitigt oder reduziert werden sollen? Hierzu müssen geeignete Untersuchungsinstrumente gefunden bzw. entwickelt und angewendet werden. Anfang der 70er begann die

Frankfurter Arbeitsgruppe neben schriftlichen Befragungen mit Assoziationstests die kognitive Struktur von Schülerinnen und Schülern zu untersuchen. Die Assoziationstests wurden wegen der problematischen Interpretation der Schülerantworten zu Paarbeziehungstests erweitert (Jung, Wiesner, Hoffmann, 1975). Piagets klinische Interviews waren ein intensiv verwendetes Standardwerkzeug (die Frankfurter Gruppe hat mehr als 1000 Interviews im Laufe der Jahre durchgeführt). In den 1970ern begann ein beispielloser internationaler Boom an Untersuchungen über Schülervorstellungen, insbesondere zur Mechanik (weit über 2000 Arbeiten sind in der SCTS-Bibliographie von Pfundt und Duit aufgelistet). Einige wichtige Arbeiten und Zusammenstellungen sind: Viennot 1979; Schecker 1985; Jung, Wiesner, Engelhardt 1981. Zusammenstellungen finden sich z.B. in SCTS (Pfundt, Duit); Driver, Squires, Rushworth, Wood-Robinson 1994; Wodzinski 1996; Müller, Wodzinski, Hopf 2007 und als Liste von p-primes im Anhang von diSessa 1993. Die Schülervorstellungen sind inzwischen sehr detailliert bekannt. Einige wenige Beispiele zur Mechanik seien hier erwähnt: Geschwindigkeit wird als Tempo verstanden, Beschleunigung eindimensional als Schneller-Werden, Kraft wird verdinglicht als etwas, was in manchen Situationen wirkt und in anderen nicht. Kraft als Substanz kann als Antreiber für eine Bewegung auf einen Körper übertragen werden und sie kann während der Bewegung aufgebraucht werden.

Eine im Hinblick auf Produktoptimierung im DBR-Sinne besonders gut geeignete Untersuchungsmethode ist die von Jung und Wiesner Mitte der 80er entwickelte Akzeptanzbefragung: Ein Erklärungsangebot wird auf verschiedene Weise auf Akzeptanz und Verständnis geprüft (Jung 1992; Wiesner 1993). Damit gelingt es sehr effektiv den Hintergrund von Lernhemmungen aufzudecken, aber auch herauszufinden, welche Lernangebote zugänglich sind. Ein wichtiges Motiv zur Entwicklung dieser Methode war die Unzufriedenheit mit den strukturierten, nicht-direktiven Interviews. Es wurde im Laufe der zahlreichen Befragungen immer deutlicher, dass viele Befragte unter dem Druck der Befragungssituation spontan Erklärungen konstruierten³, die sich erst im Verlauf des Gesprächs von diffusen, fließenden Vorstellungen zu elaborierten, ausgereiften Fehlvorstellungen entwickelten. M.a.W.: Durch die Interviews wurden bei den Befragten erst klare Fehlvorstellungen erzeugt. Damit ergab sich die Frage, ob es dann nicht vertretbarer - und für die Konstruktion von lernbaren Angeboten nützlicher ist

³ Auch Vosniadou (1994) vertritt diese Auffassung: „...we view misconceptions to be spontaneous constructions which are often generated on the spot, during the testing situation, and not deeply specific theories.“

- auf der Basis des umfangreichen vorhandenen Wissens über Lernschwierigkeiten Lernangebote zu entwickeln und deren instruktionale Wirkung in Einzelbefragungen zu testen.

Die Methode der Akzeptanzbefragungen wurde in fast allen Inhaltbereichen angewendet und mit ihr eine Fülle neuer und grundlegender Einsichten in Lernprobleme erhalten. Sie ist u.E. die effektivste Methode auf dem Wege zur Konstruktion erfolgreicher Lernumgebungen. Ihre Berechtigung – Reaktionen auf Instruktionen zu untersuchen – wird zudem durch die gegenwärtig zunehmende Einsicht in die Bedeutung der Instruktion für erfolgreiches Lernen gestützt (z.B. Klahr & Nigam, 2004; Mayer, 2004). In zwei umfangreichen Forschungsprojekten zur Mechanik war die Methode der Akzeptanzbefragungen das Hauptinstrument:

- a) Jung, Wiesner, Blumör, Spill (1992)
- b) Wodzinski (1996).

3.4 Entwicklung und Evaluation von Lehrgängen nach dem Kraftstoßkonzept

3.4.1 Konzeptentwicklung und Konzeptwechsel nach Vosniadou und diSessa

Erfahrungen aus dem eigenen Unterricht mit dem Stoßkonzept und Verallgemeinerungen aus dem Verhalten von Schülerinnen und Schülern in Interviews führten Wiesner Anfang der 80er dazu, die Dynamik über das Kraftstoßkonzept zu strukturieren.

Für die Konstruktion einer Lernumgebung ist die dabei zugrunde gelegte Sicht über Begriffswechsel und Begriffsentwicklung von erheblicher Bedeutung. In der Diskussion über Begriffswechsel spielt derzeit die Theorie von Vosniadou, Brewer u.a. (s. z.B. Vosniadou 1994) eine große Rolle. Danach entwickelt sich schon in früher Kindheit eine kleine Zahl an stabilen, theorieähnlichen, relativ kohärenten Strukturen (naive framework theory of physics) über das Verhalten von Objekten in der physikalischen Welt. Sie enthalten ontologische (z.B.: Kraft ist eine Eigenschaft eines Objekts) und epistemologische Annahmen (Sichtweisen über Erkenntnisgewinnung: z.B. sollen Erklärungen in Form kausaler Mechanismen gegeben werden) und setzen einen Rahmen für die Formulierung domainspezifischer Theorien (z.B.: Das Erscheinen der Sonne und das Verschwinden des Mondes lässt den Tag entstehen). Die Rahmenannahmen bilden ein kohärentes Erklärungssystem und haben sich über viele Jahre im Alltag bewährt. Ein Konzeptwechsel ist deshalb dann besonders schwierig, wenn diese tiefverwurzelten, bewährten Annahmen geändert werden müssen. In solchen Fällen werden oft Fehlvorstellungen entwickelt. Erfolgversprechende Lehrangebote müssen nach Vosniadou an den grundlegenden ontologischen und epistemologischen Annahmen ansetzen und nicht bei den spezifischen Theorien der Lerner oder deren synthetischen Modellen (diese sind ein Versuch der Lerner, die wissenschaftliche Auffas-

sung mit ihren naiven Rahmenvorstellungen verträglich zu machen). Der Wechsel zu neuen, aus physikalischer Sicht angemesseneren grundlegenden Annahmen ist nach Vosniadou ein sehr langwieriger Prozess.

Die Sichtweise über den Prozess der Begriffsentwicklung und des Begriffswechsels hatte sich bei der Weiterentwicklung der Mechanikkonzeption Ende der 80er von einer Sichtweise, in der „alternative Rahmenvorstellungen“ mit theorieähnlichen Strukturen den Kern bildeten, ähnlich der Theorie des Begriffswechsels von Vosniadou, geändert in eine Position, die viele Gemeinsamkeiten mit der Theorie von diSessa (1993) hat. Diese stellt bezüglich der Struktur des naiven Wissens eine Gegenposition dar.

Es war deutlich geworden, dass die in Interviews geäußerten Schülervorstellungen oft nicht die häufig behauptete Konsistenz und zeitliche Stabilität hatten (Wiesner 1993a, b), zudem sehr vielfältig sind und dass es eine deutliche Kontextabhängigkeit gibt.

Diesen Befunden wird der Ansatz von diSessa eher gerecht. DiSessa geht davon aus, dass die „naive Physik“ von Novizen aus einer Vielzahl von diskreten, fragmentierten Wissenselementen besteht, den sogenannten p-primes (phenomenological primitives). P-primes „are ‚phenomenological‘ in the sense that they are minimal abstractions from experience; they are closely tied to familiar phenomena. And they are ‚primitive‘ both in how people use them, as the obviously true ideas at the bottom level of explanation, and ... as nearly minimal memory elements, evoked as a whole ... perhaps as atomic and isolated a mental structure as one can find.“ (diSessa 1993) P-primes sind bei Novizen also nicht in eine theorieähnliche Struktur eingebettet. Sie werden abhängig von den speziellen Situationen mit unterschiedlicher Priorität aktiviert. Lernen besteht nach diSessa im Wesentlichen darin, dass neue p-primes gespeichert werden und die bereits vorhandenen in umfassenderen Strukturen organisiert werden (z.B. durch sogenannte coordination classes, diSessa und Sherin, 1998). In der Wissensstruktur von Experten gilt, dass p-primes „can no longer be self-explanatory, but must refer to much more complex knowledge structures, physics laws, etc. for justification.“ (diSessa, 1993)

Aus dieser Sicht haben wir eine erfolgversprechende Designvorschrift abgeleitet: Finde diejenigen Schlüsselreize („cues“), die aus dem Pool der nur lose organisierten p-primes geeignete anknüpfungsfähige p-primes aktivieren. Konstruiere davon ausgehend die Lernumgebung, die die gewünschte Neuordnung der p-primes zur Folge hat. „Students have a richness of conceptual resources to draw on. Attend to their ideas and help them build on the best of them.“ (diSessa, 2008) Man kann diese Lehr-Lern-Strategie auch „instruktionsinduzierte“ Begriffsentwicklung bzw. –wechsel nennen.

Bei einem Angebot ungeeigneter Reize ergibt sich: „... learning failures and misunderstandings typically occur either when the cues in the new materials activate no relevant prior schema, or when the cues activate incomplete and under-developed prior schema.“ (Vosniadou, 2008, über die Theorie von Chi, 2008)

Die Methode der Akzeptanzbefragung zielt genau darauf, ungeeignete Informationsangebote, aber vor allem geeignete „cues“ zu identifizieren und ist u.E. dafür eine hocheffiziente Methode!

Für Vosniadou ist die obige Strategie nicht empfehlenswert: „It appears that ‚instruction-induced‘ conceptual change is more difficult to happen and is likely to lead to the formation of misconceptions and the creations of inert knowledge.“ (Vosniadou, 2008)

Diese Auffassung ist u.E. nicht haltbar, denn die instruktionsinduzierte Begriffsentwicklung hat sich im letzten Jahrzehnt in mehreren Inhaltbereichen sehr erfolgreich bewährt (das in 3.1 beschriebene Projekt von JRS kann ebenfalls als ein Beispiel dafür angesehen werden). Die folgenden Diagramme zeigen in der genannten Reihenfolge die Ergebnisse von Vergleichsuntersuchungen in Optik (Herdt, 1989), Energie (Bader, 2001), Wärmelehre (Bader, 2001) und E-Lehre (Späth, 2009), die nach dieser Vorschrift entwickelt wurden.

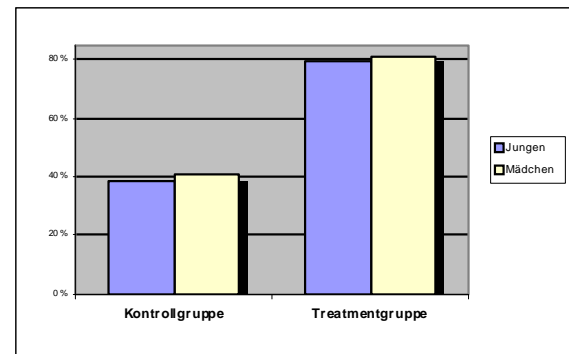
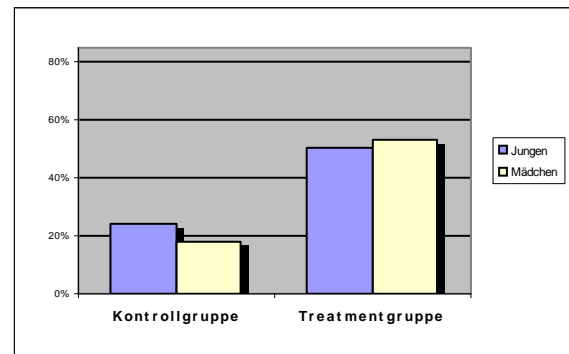
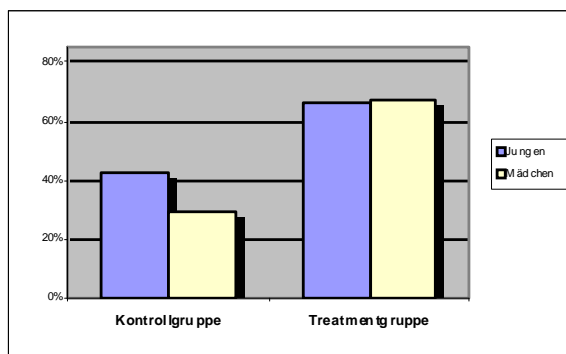
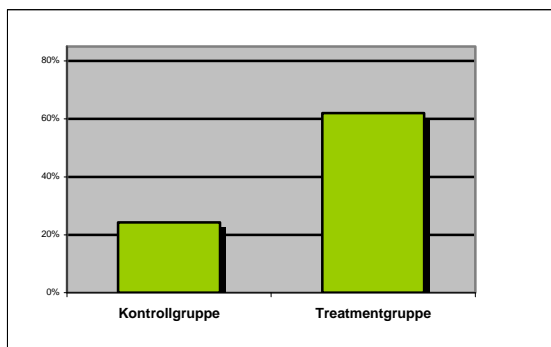


Abb. 6: Lernerfolge in den Vergleichsuntersuchungen zu Optik, Energie, Wärmelehre und E-Lehre

Die Diagramme zu Energie, Wärmelehre und E-Lehre zeigen weiterhin, dass bei den Lehrgängen, die an Schülervorstellungen orientiert entwickelt wurden, die Mädchen mindestens gleiche Leistungen erzielten wie die Jungen. Weshalb die Mädchen bei Lernumgebungen, die nach der vorstehend beschriebenen Design-Vorschrift konstruiert wurden, gleiche Lernerfolge wie die Jungen zeigen, ist noch nicht geklärt. Dies ist eine typische Grundlagenfrage, wie sie im Rahmen der Entwicklungen im DBR-Ansatz auftauchen und wissenschaftlich untersucht werden müssen.

3.4.2 Das Kraftstoßkonzept

Die Änderung vom Stoß- zum Kraftstoßkonzept bestand im Wesentlichen im Ersetzen des Stoßes durch den Kraftstoß als Produkt von Einwirkungsstärke (inklusive Einwirkungsrichtung) und Einwirkungszeit. Damit ergibt sich die Newtonsche Bewegungsgleichung als Definition der Kraft

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$$

Neben dem Begriff der Stoßrate wurde auf die Förderbandanalogie mit den für die Schüler recht anspruchsvollen Bezugssystemwechseln verzichtet, mit denen die Zusatzgeschwindigkeit als eine reale Geschwindigkeit interpretiert werden sollte. Dieses Unterrichtskonzept wurde mehrfach in 10. Klassen in Frankfurt unterrichtet und es funktionierte nach den Testergebnissen sehr gut (Wiesner 1993).

Sen (Hacettepe-Universität Ankara) griff kürzlich den Ansatz auf und führte dort eine Vergleichsuntersuchung - ebenfalls in 10. Klassen - mit sehr gutem Erfolg durch: (Sen u.a. 2008)

	KG	VG
N	69	80
Vorwissen	24,47 (8,13)	28,11 (16,80)
Nachwissen	38,60 (10,20)	67,63 (19,90)
Hedges'g	0,18	0,55
Mechanik - Test	40,26 (11,04)	60,70 (12,80)

Tabelle 2: Mittelwerte im Vor- und Nachtest (in Klammern SD) in der Vergleichsuntersuchung von Sen in Ankara (2006)

3.5 Eine Vergleichsstudie in München

Durch die bisherigen positiven Ergebnisse und durch eine weitere Studie von Schüller 2007 in Würzburg mit 7. Klassen mit ebenfalls überzeugendem Lernerfolg angeregt, wurde ab Herbst 2007 von Hopf, Waltner, Wiesner, Wilhelm und Tobias (s. ausführlich Tobias, 2010) eine umfangreiche Studie für den Mechanikunterricht in 7. Gymnasialklassen geplant und durchgeführt. Wichtig für diesen Entschluss waren die Forderungen von Lehrkräften, ihnen Hilfe bei der Gestaltung des Unterrichts zu geben, der nach neuem Lehrplan und in einer früheren Jahrgangsstufe durchzuführen war.

Die bereits vorliegende Struktur wurde weitgehend übernommen, aber eine Fülle von Detailverbesserungen eingearbeitet. Es wurde ein Schülertext ausgearbeitet (s. Abb. 7) und eine Reihe von Medien und Unterrichtsmaterialien produziert. Insbesondere die Verfügbarkeit der Videoanalyse und die Möglichkeit, sehr einfach von komplexen Bewegungen Stroboskopaufnahmen herstellen und auswerten zu können, wurden genutzt. (s. Benz, Wilhelm, 2008).



Inhaltsverzeichnis:

1. Aufgabenstellungen der Mechanik (Flanke – Kopfball – Tor!!!)
2. Die Beschreibung und Darstellung von Bewegungen
3. Wie schnell? Wohin?
 - 3.1 Tempo
 - 3.2 Richtung
 - 3.3 Geschwindigkeit
4. Die Zusatzgeschwindigkeit
 - 4.1 Zusatzgeschwindigkeit als Folge einer Einwirkung
 - 4.2 Konstruktion der Endgeschwindigkeit
 - 4.3 Konstruktion der Zusatzgeschwindigkeit
 - 4.4 Sonderfall: Eindimensionale Bewegungen
5. Die Newtonsche Bewegungsgleichung
 - 5.1 Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit
 - 5.2 Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit
 - 5.3 Masse und Zusatzgeschwindigkeit
 - 5.4 Die Newtonsche Bewegungsgleichung
6. Anwendungen der Newtonschen Bewegungsgleichung
 - 6.1 Alltagsanwendungen
 - 6.2 Das Beharrungsprinzip
7. Das Wechselwirkungsprinzip
8. Kraftarten
 - 8.1 Gravitationskraft
 - 8.2 Magnetische Kraft
 - 8.3 Elektrische Kraft
 - 8.4 Reibungskraft
9. Wenn mehrere Kräfte wirken
 - 9.1 Kraftpfeile aneinander hängen
 - 9.2 Kräftegleichgewicht

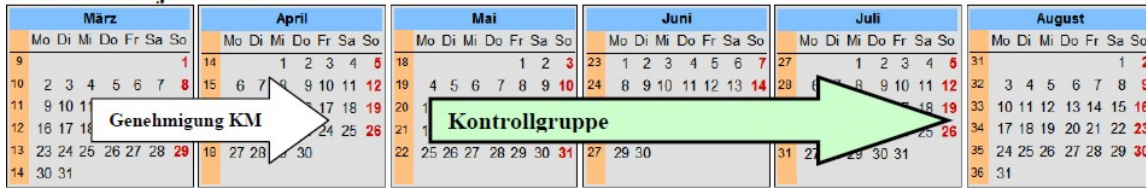
Abb. 7: Titelblatt und Inhaltsverzeichnis des Schülertextes

Außerdem wurde eine Simulation für den senkrechten Stoß erstellt, bei der die einzelnen Einflussfaktoren der Zusatzgeschwindigkeit (Einwirkstärke und -richtung, Einwirkungsdauer und Masse) variiert werden können.

Im Wintersemester 2007/08 wurde der Schülertext ausgearbeitet und die Begleitmaterialien und die Tests entwickelt bzw. zusammengestellt. Im 1. Schulhalbjahr 08/09 wurde im Würzburger Raum eine Vorstudie zur Erprobung des Lehrgangs und der Tests durchgeführt mit anschließender Materialüberarbeitung.

An der Hauptstudie nahmen 10 Lehrkräfte mit ihren Klassen aus dem Raum München teil. Sie unterrichteten im Sommer 2008 nach dem traditionellen Konzept als Kontrollgruppe (14 Klassen), und im Sommer 2009 nach dem zweidimensional-dynamischen Konzept als Treatmentgruppe (13 Klassen), so dass die Konstanz der Lehrpersonen in Kontroll- und Treatmentgruppe gesichert ist. Insgesamt ergab dies eine Stichprobe von N=521 Schülerinnen und Schülern.

2. Schulhalbjahr 07/08



1. Schulhalbjahr 08/09



2. Schulhalbjahr 08/09

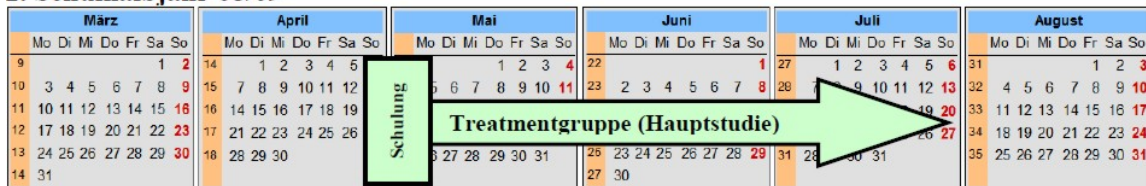


Abb. 8: Design der Hauptuntersuchung

Die Lehrpersonen wurden an einem Nachmittag in den Lehrgang eingewiesen und bekamen das ausgearbeitete Unterrichtsmaterial als Klassensatz zur Verfügung gestellt. Für die Unterrichtsgestaltung wurden den beteiligten Lehrpersonen keinerlei Empfehlungen und auch keine Vorgaben für die Unterrichtszeit der einzelnen Themen gegeben. Durch dieses Design sollte eine Feldstudie in wirklichkeitsnahem Rahmen gewährleistet werden. Eine breite Implementation des Lehrgangs ist - im Erfolgsfall - unter gleichen Bedingungen sehr einfach realisierbar.

Erhoben wurden folgende Daten für die Kontroll- sowie die Treatmentgruppe: Unterrichtstagebücher der Lehrpersonen, Prä -, Post - und Follow-Up - Tests zum Mechanik-Verständnis sowie zum Interesse am Physikunterricht, zum Selbstkonzept (Physik) und zur Selbstwirksamkeitserwartung (Mechanik) als nichtkognitive Variablen. Außerdem kam zur Parallelisierung eine Teilskala des KFT (Kognitiver Fähigkeits-Test) zur räumlichen Intelligenz zum Einsatz.

In der Treatmentgruppe wurde zusätzlich eine qualitative Evaluation des Konzeptes mit Hilfe von Unterrichtsvideos, sowie Lehrer- und Schülerinterviews durchgeführt.

Die Lehrkräfte wurden vor und nach dem Unterricht interviewt. Sie wurden dabei u.a. nach den ihnen bekannten Schülervorstellungen und ihrer Einschätzung zum Mechanikunterricht in der 7. Klassenstufe gefragt.

3.6 Ergebnisse der Mechanikstudie in München

3.6.1 Ergebnisse der kognitiven Variablen

Die detaillierte Beschreibung und Diskussion der Ergebnisse findet sich in Tobias (2010), ein Teilbericht in Tobias (2009) (s. auch die Beiträge von Tobias u.a. und von Jetzinger u.a. in der PhyDidB).

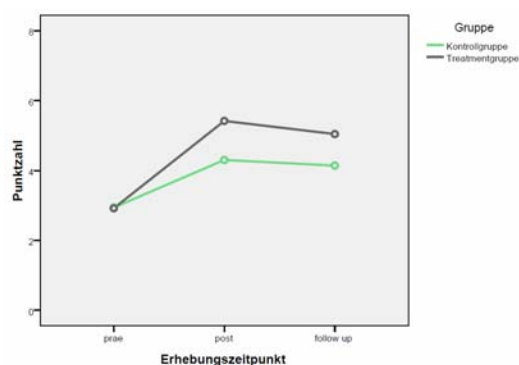
Der Mechanik-Verständnis-Test bestand aus insgesamt 17 Aufgaben (inklusive Teilitems), von denen 13 ein grundlegendes Mechanikverständnis abprüfen. (Hiervon waren 7 Items dem FCI-Test entnommen.) Zwei Items bezogen sich auf den traditionellen Unterricht (Fragen zur Beschleunigung) und zwei weitere Items auf das neue Konzept (z.B. Konstruktion der Zusatzgeschwindigkeit). Zu allen drei Testzeitpunkten wurde der gleiche Test beantwortet. Im Prä-Test ließen sich bei keiner der drei Aufgabengruppen – Grundverständnis (max. Punktzahl 13), Aufgaben zum zweidimensional-dynamischen Konzept (max. Punktzahl 2) und Aufgaben zum traditionellen Konzept (max. Punktzahl 2) - signifikante Unterschiede zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe feststellen. Für Interesse sowie räumliche Intelligenz traten aber Unterschiede zu Tage, die mit $p < .10$ mindestens tendenziell signifikant sind. Als Konsequenz wurde bei den weiteren statistischen Analysen jeweils zunächst durch eine Regressionsanalyse ein möglicher Zusammenhang der Kontrollvariablen mit den zu untersuchenden abhängigen Variablen überprüft. Gegebenenfalls wird die entsprechende Kontrollvariable als Kovariate in der Kovarianzanalyse berücksichtigt. Diese Analyse wurde mit Messwiederholung auf zwei Stufen (Post – und Follow-Up - Test) nach den festen Faktoren Gruppe, Lehrperson und Geschlecht durchgeführt. Bezüglich der Aufgaben zum Grundverständnis ergaben sich ein höchst signifikanter Effekt mit mittlerer Effektstärke durch die Gruppenzugehörig-

keit ($F(1; 449) = 30.86$; $p < .001$; $\text{part } \eta^2 = .06$). Bei den zwei Items zum Unterricht nach zweidimensional-dynamischem Konzept lieferte die Kovarianzanalyse erwartungsgemäß einen höchst signifikanten Einfluss mit einer großen Effektstärke durch die Gruppenzugehörigkeit der Lernenden ($F(1; 459) = 240.46$; $p < .001$; $\text{part } \eta^2 = .34$). Bei den beiden Items zum Unterricht nach traditionellem Konzept lieferte die Kovarianzanalyse dagegen keinen signifikanten Einfluss durch die Gruppenzugehörigkeit der Lernenden ($F(1; 449) = 2.50$; $p = .115$; $\text{part } \eta^2 = .01$). Die deskriptiven Befunde zum Mechanik-Verständnis nach dem Unterricht in Kontroll- und Treatmentgruppe finden sich in Tabelle 3 und den nachfolgenden Diagrammen.

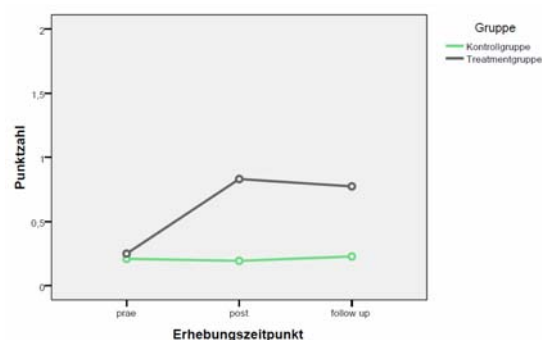
		Post	Follow Up
Kontrollgruppe	Grundverständnis	4,27 (2,02)	4,11 (2,00)
	2-d. dynam. Konzept	0,17 (0,41)	0,22 (0,43)
	Traditionelles Konzept	0,67 (0,55)	0,69 (0,53)
Treatmentgruppe	Grundverständnis	5,42 (2,24)	5,06 (2,32)
	2-d. dynam. Konzept	0,84 (0,56)	0,85 (0,59)
	Traditionelles Konzept	0,61 (0,51)	0,64 (0,52)

Tabelle 3: Mittelwerte im Post - und Follow-Up - Test (in Klammern SD) der Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung von Hopf, Waltner, Wiesner, Wilhelm und Tobias in München

Grundverständnis in Mechanik:



Aufgaben zum zweidimensional-dynamischen Konzept:



Aufgaben zum traditionellen Konzept:

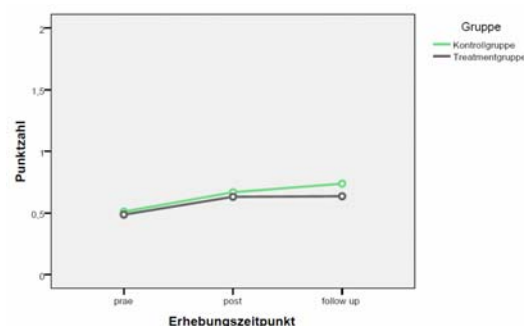


Abb. 9: Ergebnisse in Kontroll- und Treatmentgruppe zu den drei Messzeitpunkten

Interessant ist der Vergleich Jungen-Mädchen, dessen deskriptive Befunde zum Mechanik-Verständnis in Tabelle 4 zu finden sind. Sowohl in der Kontroll- ($t_{(df=264)} = 3.00$; $p = .003$)- als auch in der Treatmentgruppe ($t_{(df=253)} = 3.60$; $p < .001$) waren die Jungen den Mädchen im Prä-Test bei den Aufgaben zum Grundverständnis hoch, bzw. höchst signifikant überlegen. Während dieser Unterschied nach Unterricht in der Kontrollgruppe im Post- und im Follow-Up – Test bestehen bleibt (post: ($df=264$) = 2.77; $p = .006$; follow up: $t_{(df=264)} = 3.93$; $p < .001$), sind in der Treatmentgruppe im Post- und im Follow-Up – Test keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geschlechtern feststellbar (post: $t_{(df=253)} = 1.35$; $p = .178$; follow up: $t_{(df=253)} = 1.66$; $p = .098$).

		Prä	Post	Follow Up
Kontrollgruppe	M	3,18 (1,44)	4,62 (2,08)	4,58 (2,00)
	W	2,68 (1,29)	3,94 (1,91)	3,64 (1,88)
		**	**	***
Treatmentgruppe	M	3,13 (1,41)	5,57 (2,38)	5,25 (2,48)
	W	2,53 (1,11)	5,18 (1,99)	4,76 (2,01)
		***	n.s.	n.s.

Tabelle 4: Mittelwerte im Prä -, Post - und Follow-Up - Test (in Klammern SD) nach Geschlechtern (***) höchstsignifikant; ** hoch signifikant)

Die in 3.4.1 angeführten Befunde, dass die Mädchen von erfolgreicher lernbaren Unterrichtskonzeptionen besonders stark profitieren können, zeigt sich hier für die Einführung in die Mechanik ebenfalls.

3.6.2 Ergebnisse zu nicht-kognitiven Variablen:

Hier waren keine Effekte durch das Unterrichtskonzept nachzuweisen.

3.6.3 Ergebnisse der Schülerinterviews

In dem schriftlichen Mechaniktest waren keine Aufgaben zur Newtonschen Bewegungsgleichung (NBG) enthalten. Deshalb wurden von Tobias und Jetzinger mit 52 Schülerinnen und Schülern (je 4 zufällig ausgewählte Schülerinnen und Schülern aus den 13 Klassen der Treatmentgruppe) Interviews zu Zusatzgeschwindigkeit und Kraft sowie dem Umgang mit der NGB durchgeführt. (Detaillierte Ergebnisse dieser Interviews finden sich in Jetzinger, 2010 und Tobias 2010.) Es war verblüffend, wie gut die Schülerinnen und Schüler – gelegentlich nach schwachen Impulsen – physikalisch argumentieren konnten. Das nachfolgende Interviewbeispiel belegt dies sehr eindrucksvoll.

I: Kannst du die Newtonsche Bewegungsgleichung angeben?

S: Ja, die Kraft mal die Einwirkungsdauer, ist gleich der Masse mal die Zusatzgeschwindigkeit (schreibt die Gleichung auf: $F \Delta t = m \Delta \vec{v}$).

I: Was bedeuten denn diese Pfeile [über den Formelzeichen F und $\Delta \vec{v}$]?

S: Der Pfeil bedeutet, dass das auch eine Richtung hat.

I: Ja genau, super. Eine Aufgabe noch: Wenn wir noch mal an das Auto denken und uns vorstellen, das kommt hier von der Fahrbahn ab (Interviewer verweist auf bildliche Darstellung). Und dann zwei Situationen im Vergleich: Also das

soll das gleiche Auto sein und es soll auch die gleiche Geschwindigkeit haben. Dann fährt es hier einmal in eine Betonmauer, und einmal in einen Reifenstapel. Da kommen die beiden Autos zum Stehen, also die Endgeschwindigkeit ist Null. Gibt es da unterschiedliche Auswirkungen auf die Fahrer?

S: Ja, also das (zeigt auf Mauer) gibt nicht nach, also das ist etwas Festes. Da (zeigt auf die Reifen) ist die Einwirkungsdauer länger, denn die Reifen geben ja nach. Und das kann man sich hiermit auch gut merken (zeigt auf die aufgeschriebene Gleichung), weil wenn die Einwirkungsdauer größer ist, dann muss die Kraft ja kleiner sein.

I: Warum denn?

S: Wenn das hier gleich bleibt (zeigt auf m und $\Delta \vec{v}$ der rechten Seite der Gleichung), dann muss das (zeigt auf die rechte Seite der Gleichung) das Gleiche sein wie das (zeigt auf die linke Seite der Gleichung). Und wenn das (zeigt auf Δt) jetzt größer wird, dann muss das (zeigt auf \vec{F}) kleiner werden, sonst bleibt es nicht gleich.

I: Ja, genau. Ist das hier jeweils gleich auf der rechten Seite in den beiden Fällen?

S: Ja, weil, es ist ja das gleiche Auto, also auch gleiche Masse. Und Sie haben ja gesagt, die Geschwindigkeit war auch gleich, und die Zusatzgeschwindigkeit - wenn das dieselbe Situation ist - auch.

3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Studie in München:

- Das Kraftstoßkonzept ist den üblichen Zugängen zur Mechanik deutlich überlegen. Die Schülerinnen und Schüler erreichen ein signifikant höheres Verständnis.
- Auch ohne ausführliche Einweisung in das neue Konzept können die Lehrkräfte den Lehrgang sehr erfolgreich umsetzen.
- Die Akzeptanz des Konzeptes ist bei den beteiligten Lehrkräften sehr hoch.
- Eine für das Lehren und Lernen von Physik geeignete Theorie der Begriffsentwicklung und des Begriffswechsels muss Aspekte der Theorien von Chi u.a. (Kategorienwechsel), Vosniadou u.a. (Wechsel von Rahmenvorstellungen) und diSessa (Anknüpfung an geeignete p-primes) integrieren.
- Ob die 7. Klassenstufe für den Beginn des Mechanikunterrichts optimal ist, muss geprüft werden.

4. Schlussbemerkungen

Nach den bisherigen Ausführungen ergibt sich folgendes Fazit:

Der Design-Based Research-Ansatz hat sich für den Physikunterricht bewährt und er sollte sich in der Fachdidaktik etablieren. Die Diskussion über Forschungsansätze in der Didaktik der Physik und die

damit verknüpften Ziele sollte intensiviert werden. Der Briefwechsel zwischen H. Schecker und H. E. Fischer (2009) ist diesbezüglich ein Anfang. Kann man das Arbeitsprogramm von Fischer und seine im Briefwechsel dargestellte Position als orientiert an der eher reinen Grundlagenforschung ansehen, so vertritt Schecker eine Sicht, die weitgehend der nutzenorientierten Grundlagenforschung bzw. dem DBR-Ansatz entspricht und deren Sinn und Bedeutung wir in diesem Beitrag verdeutlichen wollten. DBR greift die relevanten Probleme des Physikunterrichts aus Sicht der Praktiker auf, es werden Lernumgebungen produziert, die „funktionieren“ und den aktuellen Forschungsstand berücksichtigen. Der Ansatz liefert Beiträge zu einer Theorie des Lehrens und Lernens physikalischer Inhalte und zu Theorien für das Design von erfolgreichen Lernumgebungen. Die Analyse vor einer Revision der Lernumgebung liefert Hinweise auf die relevanten Probleme, die kurzfristig in die Überarbeitung eingehen oder langfristig in der Grundlagenforschung zu klären sind.

5. Literatur

- M. Bader: Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges „Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre“, Dissertation Universität München, 2001
- M. Benz, T. Wilhelm: *measure Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse* In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Berlin 2008*, Lehmanns Media, Berlin, 2008
- C. Bereiter (2002). *Design Research for Sustained Innovation*. *Cognitive Studies, Bulletin of the Japanese Cognitive Science Society* 9(3): 321-327
- H. Burkhardt, A. Schoenfeld: *Improving educational research: Toward a more useful, more influential, and better funded enterprise*. *Educational Researcher* 32 (2003), S. 3-14
- M. Chi: *Three Types of Conceptual Change: Belief Revision, Mental Model Transformation, and Categorical Shift*. In: S. Vosniadou (Ed.): *International Handbook of Research on conceptual Change*, Routledge, 2008, S. 61-82
- Design-Based Research Collective: *design-based Research: an emerging paradigm for educational inquiry*. *Educational Researcher* 32 (2003), S. 5-8
- A.A. diSessa: *Toward an Epistemology of Physics*. *Cognition and Instruction* 10 (1993), S. 105-225
- A.A. diSessa, B. Sherin: *What changes in conceptual change?* *Int. J. Sci. Educ.* (1998), S. 1155-1191
- M. Donaldson: *Wie Kinder denken*. Bern, Stuttgart, Wien 1982
- Driver, R., Squires, A., Rushworth, P. & Wood-Robinson, V. (1994). *Making Sense of Secondary Science*. *Research into Children's Science*. London und New York: Routledge.
- F. Fischer, M. Waibel, C. Wecker: *Nutzenorientierte Grundlagenforschung im Bildungsbereich*. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaften* 8 (3) (2005), s. 427-442
- D. Herdt: *Einführung in die elementare Optik. Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrgangs*. Westarp, Essen 1989
- M. Hopf, A. Sen, C. Waltner, H. Wiesner. (2008): *Dynamischer Zugang zur Mechanik*. In: Nordmeier, V., Grötzebach, H., (Hrsg.): *Didaktik der Physik – Berlin 2008*. Berlin: Lehmanns Media.
- M. Hopf, H. Wiesner: *Paradigmen für physikdidaktische Forschung – ein Rück- und Ausblick: Physikdidaktik und Design-Based Research*. In: St. Kolling (Hrsg.): *Beiträge zur Experimentalphysik, Didaktik und computergestützten Physik*. *Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. Hans-Josef Pratt*, Logos Verlag Berlin, 2007, S.37-57
- K. Hoffmann, W. Jung, H. Wiesner: *Welche Informationen liefern Assoziationen von Schülern für den Physikunterricht?* In: H. Dahncke (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie*, Hannover, 1975, S.279-289
- F. Jetzinger, V. Tobias, C. Waltner, H. Wiesner (2010): *Dynamischer Mechanikunterricht – Ergebnisse einer qualitativen Interviewstudie*. In: Nordmeier V. (Red.): *Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG, Didaktik der Physik*
- W. Jung, H. Reul, H. Schwedes: *Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3-6*. Diesterweg, Frankfurt am Main, 1975
- W. Jung, H. Callsen: *Newtonsche Mechanik. Versuch eines neuen Zugangs für den Unterricht*. *Naturwissenschaften im Unterricht* 6/24, (1976) S. 231-236
- W. Jung: *Zur Einführung des Kraftbegriffs*. *physica didact.* (1977a), S 171-187
- W. Jung: *Wege in die Mechanik*. *phys. did.* 4 (1977b) S. 219-229
- W. Jung: *Aufsätze zur Didaktik der Physik und Wissenschaftstheorie*. Diesterweg, Frankfurt am Main 1979
- W. Jung (1980). *Mechanik für die Sekundarstufe I*. Diesterweg, Frankfurt am Main
- W. Jung, H. Wiesner, P. Engelhardt: *Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newtonschen Mechanik*. *Empirische Untersuchungen und ansätze zu didaktisch-methodischen Folgerungen*. Verlag Barbara Franzbecker, Bad Salzdetfurth, 1981
- W. Jung: *Probing Acceptance. A technique for investigating learning difficulties*. In: R. Duit, F. Goldberg, H. Niedderer (Eds.): *Research in Physics Learning. Theoretical Issues and Empirical Studies*. Kiel 1992, S. 278-295
- W. Jung, H. Wiesner, L. Spill, R. Blumör: *Lernprozesse in Mechanik. Abschlussbericht der DFG-Projekte Ju 150/4-1 und Ju 150/4-2*, Frankfurt am Main, 1992
- D. Klahr, M. Nigam: *The Equivalence for Learning Paths in Early Science Instruction. Effects of Direct Instruction and Discovery Learning*. *Psychological Science* 15 (10) (2004) S. 661-667
- H. Mandl, R. Stark: *Pasteur's quadrant in educational psychology: Use-inspired basic research to over-*

- came the gap between theory and Practice. Vortrag auf der AERA 2001, Seattle
- R.E. Mayer: Should there be a three-strike rule against pure discovery learning. *American Psychologist* 59 (2004) 14-19
- R. Müller, R. Wodzinski, & M. Hopf (Hrsg.) (2007). *Schülervorstellungen in der Physik*. Köln: Aulis.
- STCSE (Students' and Teachers' Conceptions and Science Education), abrufbar über www.ipn.uni-kiel.de
- M. Reiner, J.D. Slotta, M. Chi, L. Resnick (2000). Naive Physics Reasoning: A Commitment to Substance-Based Conceptions. *Cognition and Instruction* 18(1), 1-34
- G. Reinmann (2005): Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. *Unterrichtswissenschaft* 33 (1), 52-69.
- H. Schecker: Das Schülervorverständnis zur Mechanik. Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftstheoretischer Aspekte, Dissertation Universität Bremen, 1985
- H. Schecker, H. E. Fischer: Kontroversen zu den Standards in Deutschland – ein Briefwechsel. P. Labudde u.a.: Bericht über die GDCP-Zwischentagung 2009 in Basel. *Zeitschrift für die Didaktik der Naturwissenschaften*, Jg. 15, 2009
- F. Schüller, T. Wilhelm: Ein Unterrichtskonzept zur Mechanik in Jahrgangsstufe 7 – zweidimensional und multimedial. In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik* - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin, 2008,
- R.J. Shavelson: Some aspects of the correspondence between content structure and cognitive structure in physics instruction. *JRScT* 1972, S. 225-234
- S. Späth: Überarbeitung und empirische Untersuchung eines Unterrichtskonzeptes zur Einführung in die Elektrizitätslehre. Zulassungsarbeit Universität München
- E. Stern: (2003): Kompetenzerwerb in anspruchsvollen Inhaltsgebieten bei Grundschulkindern. In: Cech, D./Schwier, H.-J. (Hrsg.): *Lernwege und Aneignungsformen im Sachunterricht*. Klinkhardt. Bad Heilbrunn. 37-58
- V. Tobias: Newtonsche Mechanik im Anfangsunterricht. Die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen. Dissertation Universität München, in Vorbereitung
- V. Tobias, C. Waltner, M. Hopf, T. Wilhelm, H. Wiesner (2009): Sachstruktur im Mechanikunterricht – Wie gehen Lehrkräfte damit um? In: Höttecke D. (Red.): *Beiträge zur Jahrestagung des GDCP*, Dresden, im Druck
- V. Tobias, C. Waltner, M. Hopf, T. Wilhelm, H. Wiesner (2010): Dynamischer Mechanikunterricht – Ergebnisse einer quantitativen Vergleichsstudie. In: Nordmeier V. (Red.): *Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG, Didaktik der Physik*
- L. Viennot: Spontaneous Reasoning in Elementary Dynamics. *Eur. J. Sci. Educ.* 1 (1979), S. 205-221
- St. Vosniadou: Capturing and Modelling the Process of Conceptual Change. *Learning and Instruction* 4 (1994), S. 45-69
- S. Vosniadou (Ed.): *International Handbook of Research on conceptual Change*, Routledge, 2008, S. xvii
- H. Wiesner: Wie erklären Mittelstufenschüler nach Optikunterricht die Abbildung an Lochblenden? In: K.Wiebel (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie*. Alsbach 1992, S.302-304
- H. Wiesner: Verbesserung des Lernerfolgs durch Untersuchungen von Lernschwierigkeiten im Physikunterricht, Habilitationsschrift, Universität Frankfurt/M., 1993
- H. Wiesner: Unterrichtsversuche zur Einführung in die Newtonsche Mechanik. In: H. Wiesner: Verbesserung des Lernerfolgs durch Untersuchungen von Lernschwierigkeiten im Physikunterricht, Frankfurt/M. 1992c, S.261-272
- H. Wiesner: Zum Einführungsunterricht in die Newtonsche Mechanik: Statisch oder dynamisch? In: *Naturwissenschaften im Unterricht*, Heft 22 (1994a) S.16-23
- H. Wiesner: Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik: Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und fachdidaktische Folgerungen. In: *Physik in der Schule* (1994b) S.122-126
- H. Wiesner: Physikunterricht - an Schülervorstellungen orientiert. In: *Unterrichtswissenschaft* 23 (1995) S.127-145
- F. Wilkening & S. Lamsfuß (1993): (Miß-)Konzepte der naiven Physik im Entwicklungsverlauf. In W. Hell, K. Fiedler & G. Gigerenzer (Eds.), *Kognitive Täuschungen* (pp. 271-290). Heidelberg: Spektrum
- R. Wodzinski, H. Wiesner: Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Beschreibung von Bewegungen und Geschwindigkeitsänderungen. In: *Physik in der Schule* (1994a) S.164-168
- R. Wodzinski, H. Wiesner: Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Zusatzbewegung und Newtonsche Bewegungsgleichung. In: *Physik in der Schule* (1994b) S.202-207
- R. Wodzinski, H. Wiesner: Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Die Newtonsche Bewegungsgleichung in Anwendungen und Beispielen. In: *Physik in der Schule* (1994c) S.331-335
- R. Wodzinski, Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht. Dissertation Universität Frankfurt am Main, LIT, Münster 1996